

内航船舶用排熱回収システムに用いる実験用スターリングエンジンの性能特性

Performance of Experimental Stirling Engine for Marine Heat Recovery System

正 平田 宏一（海技研） 正 西尾 澄人 石村 恵以子
正 今井 康之 正 川田 正國

Koichi HIRATA, Sumito NISHIO, Eiko ISHIMURA, Yasuyuki IMAI and Masakuni KAWADA,
National Maritime Research Institute., Tokyo

When a freight ship is in a harbor, a Diesel engine generator is operated to supply electric energy in the ship. Exhaust gas from the Diesel engine causes air pollution in the harbor area. We have tried to develop a heat recovery system with a Stirling engine generator. In this paper, we report the performance of an experimental Stirling engine for the system. The Stirling engine was operated with the exhaust gas from a Diesel engine, and got indicated power of 750 W and generated power of 280 W approximately.

Key words: Stirling Engine, Waste Heat Recovery System, Ship and Marine Diesel Engine

1. まえがき

港湾に停泊している内航船舶のディーゼルエンジンから放出される排ガスは、港湾地域の大气環境汚染の原因となっている。著者らは、その解決策の一つとして、運航中のディーゼルエンジンから放出される排熱をスターリングエンジン発電機によって回収する排熱回収システムの開発を進めている¹⁾。本報では、当研究所内に設置されている船用ディーゼルエンジンの排ガスを熱源としたスターリングエンジンの運転結果並びに各エンジンのエネルギーバランスについて報告する。

2. 内航船舶用排熱回収システムの概要

本研究で開発を進めている排熱回収システムは小型船舶を対象としており、400 程度のディーゼルエンジンの排ガスを用いてスターリングエンジンを運転し、発電された電気エネルギーを蓄電池に充電する。そして、停泊中に蓄電された電気エネルギーを船内電力として利用する。これにより、港湾内で発電用ディーゼルエンジンを運転する必要がなくなり、港湾内の地域環境の改善が期待される。

スターリングエンジンの最終目標出力は 2 kW であり、50 時間程度をかけて 100 kWh の蓄電池に充電する。そして、貨物の荷役に要する 10 kW × 10 時間に利用することを想定している。また、将来的には複数のスターリングエンジンを多段構成として排熱回収をすることとしている。以下の実験においては、目標出力 500 W の 1 機のスターリングエンジンを陸上に設置されている船用ディーゼルエンジンの排ガスを用いて運転している。

3. 実験用エンジンシステムおよび実験条件

表 1 に実験に用いた船用ディーゼルエンジンの仕様を示す。なお、予備試験により、ディーゼルエンジンに与える負荷を大きくすると、スターリングエンジンの熱交換器や

排ガス配管の圧力損失の影響を受けて排ガス温度は上昇し、設計温度である 400 を上回ることが確認された。そのため、以下の実験においては排ガス温度が約 400 になるように回転数と水動力計による負荷を調整する。これは同一回転数におけるスクリュウ推進による船用負荷よりもかなり軽い負荷である。また、ディーゼルエンジンのエネルギーバランスを求めるためには、入熱量、軸出力、冷却水へ流れる熱量（冷却損失）及び排ガスへ流れる熱量（全排ガス熱量）の評価が必要となる。各熱量の導出には入口・出口の流体温度並びに流量を測定する。しかし、冷却水流量は温度制御装置の作動により変動が大きいこと、さらに排ガス流量を過給圧力、回転数及び行程容積から簡易的に求めていることから、高精度な評価には至っていない。

図 1 に実験用スターリングエンジンの構造、表 2 に仕様並びに実験条件を示す。クランクケースには耐圧構造とした誘導式発電機を取り付けている。以下の実験では、発電負荷を変化させて回転数に対する出力特性を調べる。

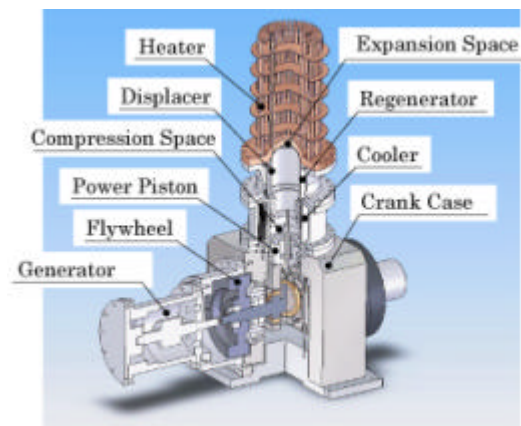


Fig. 1, Prototype Stirling Engine

Table 2, Specifications and Operating Conditions of Prototype Stirling Engine

| Engine Type | Beta type |
|---------------------|----------------|
| Piston Diameter | 100 mm |
| Displacer Stroke | 36 mm |
| Power Piston Stroke | 28 mm |
| Working Gas | Helium |
| Mean Pressure | 3 MPa |
| Target Power | 500 W |
| Generator | Induction type |

Table 1, Specifications of Diesel Engine

| | |
|--------------------|--|
| Engine Type | Matsui MU323DGSC (3 cylinder, 4 stroke) |
| Cylinder Bore | 230 mm |
| Piston Stroke | 380 mm |
| Rated Power | 257 kW (350 PS) |
| Rated Engine Speed | 420 rpm |
| Fuel | Heavy Oil (A) |

4. 実験用排熱回収システムの性能特性

図2はディーゼルエンジンの出力・熱損失及び排ガス温度の実験結果である。これより、冷却損失は回転数の上昇に伴い急激に増加していることがわかる。これは冷却水の温度制御による冷却水流量の変動の影響を大きく受けていると考えられ、詳細な性能評価を行う場合には測定・制御系を見直す必要がある。また、定格回転数 420 rpm における軸出力は 117 kW であり、定格出力の 1/2 以下である。

図3はスターリングエンジンの実験結果の一例であり、ディーゼルエンジンの回転数を 420 rpm としたときの温度並びに出力特性を示している。これより、スターリングエンジンの高温空間作動ガス温度（膨脹空間ガス温度）は 300 程度であることがわかる。また、図示出力は回転数が高まるに従って上昇し、1000 rpm 以上の回転数域において約 700 W が得られている。軸出力は、別途無負荷運転試験から求めた機械損失に基づき試算しており、約 500 W が得られている。発電出力は 280 W 程度であり、発電機効率がかなり低い。これは、誘導発電機に接続した電動機用汎用インバータにおける損失が大きいためであると考えている。現在、高効率発電機並びにインバータの開発を進めており、発電機効率は大幅に改善される見込みである。

図4は、最高発電出力が得られたときのディーゼルエンジン及びスターリングエンジンのエネルギーバランスを示している。ディーゼルエンジンへの全入熱量は 429 kW であり、そのうち、27 % の 117 kW が軸出力に変換されている。そして 48 % の 204 kW が冷却水に、25 % の 108 kW

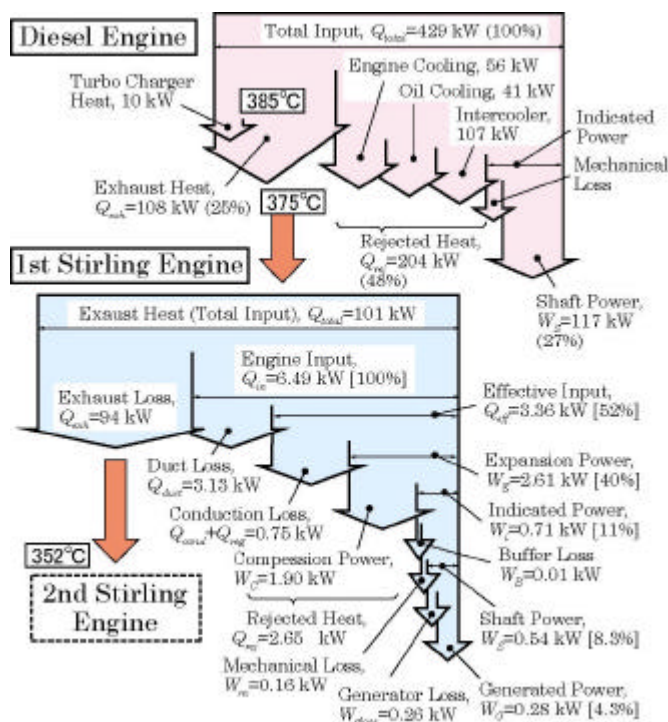


Fig. 4, Energy Balance of Heat Recovery System

が排気ガスへと流れている。スターリングエンジンは、配管部でのわずかな放熱を差し引いた排ガス熱量 101 kW のうち 6.4 % の 6.5 kW をエンジン入熱量としてダクト内に取り入れ、残りの大部分は排ガス損失として放出している。取り入れられたエンジン入熱量のうち 3.4 kW がエンジン内に取り込まれ（有効熱入力）、2.6 kW が作動ガスに伝わり（膨脹空間図示出力）、710 W が図示出力に変換されている。そして、280 W の発電出力が得られており、スターリングエンジンにおけるエンジン入熱量を基準とした図示熱効率は 11 %、発電端効率は 4.3 % である。一方、ディーゼルエンジンの全排ガス熱量を基準とした場合、図示熱効率は 0.7 %、発電端効率は 0.3 % である。

5. あとがき

以上、内航船舶用排熱回収システムの開発を目的として、ディーゼルエンジンの排ガスを熱源としたスターリングエンジンの運転を行った。その結果、まだ十分な性能とは言えないが、今までは大気へ放出していた排熱から 280 W の有効な出力を回収することができた。さらに、各種熱損失の内訳が明確になり、熱損失低減のための改善箇所が明らかになった。一方、本排熱回収システムの実用性・有効性についての考察は今後の課題である。今後、スターリングエンジンの多段化等の開発を進め、排熱回収率を向上させるとともに、本排熱回収システムの高性能化・実用化を目指していきたいと考えている。

本研究は（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構 基礎的研究推進制度により実施されているものであり、関係各位並びに共同研究メンバーに対し、深い感謝の意を表したい。

文 献

- (1) 平田ほか、スターリングエンジンを用いた排熱回収システムの開発（第 1 報 実験用エンジンの設計・試作並びに性能特性）、日本機械学会第 10 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集、p. 97-100、2006。

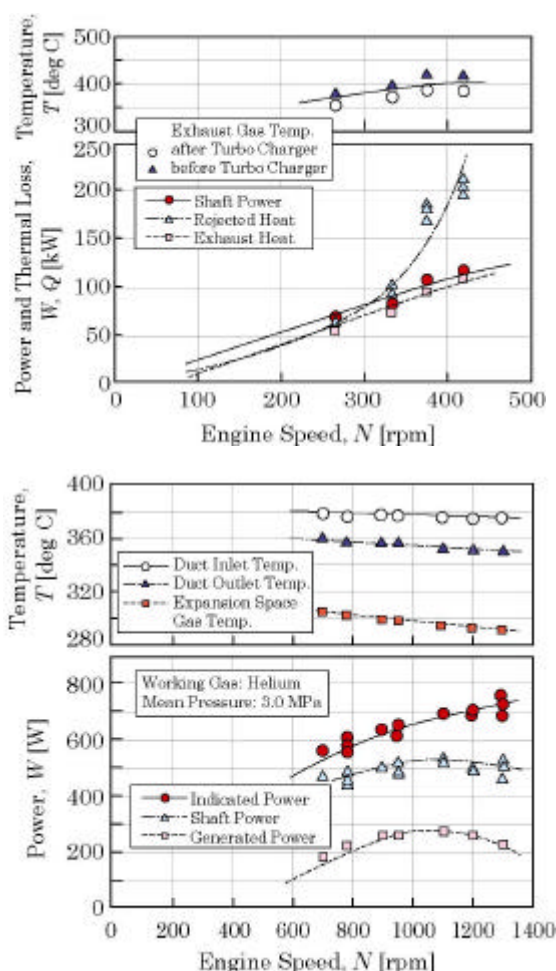


Fig. 3, Experimental Results of Stirling Engine